

FISICA Y EXPERIMENTACION

(*Physics and experiment*)

Allan FRANKLIN*

* Department of Physics, Campus Box 390, University of Colorado, Boulder, CO 80309-0390, USA.

BIBLID [0495-4548 (2002) 17: 44; p. 221-242]

RESUMEN: En el presente artículo examino los papeles que puede desempeñar el experimento en ciencia. Los experimentos pueden servir para contrastar teorías, pero también pueden requerir una nueva teoría. Pueden ofrecer indicios acerca de la forma matemática de una teoría, o pueden suministrar evidencia a favor de la existencia de las entidades involucradas en las teorías. Finalmente, pueden tener una vida propia, independiente de la teoría. Ilustraré estos papeles empleando episodios de la historia de la física contemporánea. Asimismo, discutiré una epistemología de la experimentación, un conjunto de estrategias que ofrece bases para una creencia razonable en los resultados experimentales.

Descriptores: experimento, física del siglo XX, epistemología, relaciones teoría-experimento.

ABSTRACT: *In this paper I examine the roles that experiment plays in science. Experiment can test theories, but it can also call for a new theory. Experiment can also provide hints about the mathematical form of a theory. Likewise it can provide evidence for the existence of the entities involved in our theories. Finally, it may also have a life of its own, independent of theory. I will illustrate these roles using episodes from the history of contemporary physics. I will also discuss an epistemology of experiment, a set of strategies that provides grounds for reasonable belief in experimental results.*

Keywords: *experiment, twentieth century physics, epistemology, relation theory-experiment.*

SUMARIO

1. Los resultados experimentales
 - 1.1. Aprender de la experimentación
 - 1.2. Objeciones
 2. Las funciones del experimento
 - 2.1. Una vida propia
 - 2.2. Confirmación y refutación
 - 2.3. Complicaciones
 - 2.4. Otras funciones
 3. Conclusión
- Bibliografía

La física y, según creo, la totalidad de la ciencia es una empresa razonable basada en evidencia experimental válida, en la crítica, y en la discusión racional. Nos suministra conocimiento del mundo físico, y es la experimentación quien nos suministra la evidencia en la que se enraíza dicho conocimiento. En estos tiempos postmodernos, esa puede parecer una concepción anticuada, mas según creo es correcta. No todos estarían de acuerdo. Como ha señalado Andrew Pickering, "nadie que esté configurando una concepción del mundo tiene ninguna obligación de tomar en cuenta lo que la ciencia del siglo veinte tiene que decir" (Pickering 1984a, p. 413). En este ensayo argumentaré a favor del primer enfoque.

El experimento desempeña muchos papeles en la ciencia. Uno de sus papeles importantes es contrastar teorías y suministrar la base para el conocimiento científico. También puede requerir una nueva teoría, ya sea mostrando que otra aceptada es incorrecta, o exhibiendo un fenómeno nuevo que necesita explicación. El experimento puede darnos pistas sobre la estructura o la forma matemática de una teoría, y puede suministrar evidencia a favor de la existencia de las entidades involucradas en nuestras teorías. Por último, puede también tener una vida propia, independiente de la teoría. Los científicos pueden investigar un fenómeno simplemente porque parece interesante. Esto, a su vez, suministrará evidencia a explicar por una futura teoría. Como veremos más abajo, un solo experimento puede desempeñar varios de estos papeles a la vez.

Sin embargo, a lo largo de todas esas actividades hemos de recordar que la ciencia es falible. Tanto los cálculos teóricos, como los resultados experimentales, o la comparación entre experimento y teoría pueden ser incorrectos. La ciencia es algo más complejo que "el científico propone, la Naturaleza dispone". Puede que no siempre resulte claro qué es lo que el científico propone. A menudo las teorías necesitan ser articuladas y clarificadas. Puede también que no esté claro cómo es lo que la Naturaleza dispone. Los experimentos no siempre ofrecen resultados nítidos, e incluso pueden estar en desacuerdo durante un tiempo.

Si la experimentación ha de desempeñar todos esos importantes papeles en la ciencia, debemos tener buenas razones para creer en los resultados experimentales. Más abajo presentaré una epistemología de la experimentación, un conjunto de estrategias que da por resultado creencia razonable en los resultados experimentales. Entonces, el conocimiento científico puede estar razonablemente basado en dichos resultados experimentales.

1. Los resultados experimentales

1.1. Aprender de la experimentación

Hace ya casi dos décadas que Ian Hacking formuló la pregunta "¿Vemos a través de un microscopio?" (Hacking 1981). La pregunta de Hacking estaba, en realidad, inquiriendo cómo llegamos a creer en un resultado experimental obtenido gracias a un aparato experimental complejo. ¿Cómo distinguimos entre un resultado válido¹ y un artificio creado por el aparato? Si el experimento ha de desempeñar en la ciencia todos los importantes papeles que se mencionaron arriba, y ha de suministrar la base evidencial para el conocimiento científico, entonces debemos tener buenas razones para creer en dichos resultados. Hacking ofreció una respuesta *in extenso* en la segunda parte de su *Representar e intervenir* (1983). Señaló que, aunque un aparato experimental está cargado de -cuando menos- la teoría del aparato, las observaciones mantienen su firmeza a pesar de cambios en la teoría del aparato o de la teoría del fenómeno. Su ejemplo fue la continuada creencia en las imágenes microscópicas a pesar del gran cambio en la teoría del microscopio que tuvo lugar cuando Abbe señaló la importancia de la difracción en su modo de operar. Una explicación dada por Hacking es que al realizar tales observaciones los experimentadores intervinieron: manipularon los objetos que estaban siendo observados. Así, al mirar una célula por el microscopio uno puede inyectar fluido en la célula o realizar una tinción del espécimen. Uno espera que la célula cambie de forma o de color cuando esto se realiza. La observación del efecto predicho refuerza nuestra creencia tanto en la buena operación del microscopio como en la observación.

Hacking discutió también cómo la creencia en una observación es reforzada por la confirmación independiente. El hecho de que el mismo patrón de puntos -cuerpos densos en las células- sea observado con "diferentes" microscopios, por ejemplo ordinarios, de polarización, de contraste de fases, de fluorescencia, de interferencia, electrónicos, acústicos, etc., habla a favor de la validez de la observación. Hacking argumentó correctamente que sería una coincidencia absurda si el mismo patrón de puntos se produjera en dos sistemas físicos de tipos completamente diferentes. Los diferentes aparatos tienen trasfondos y errores sistemáticos diferentes, haciendo que la coincidencia resulte sumamente improbable si es un artificio. La coincidencia de resultados resulta comprensible si el resultado es correcto, y

los instrumentos están trabajando adecuadamente. (Véase también Franklin y Howson 1984).

¿Qué sucede, en cambio, cuando uno sólo puede realizar el experimento con un tipo de aparato, tal como un microscopio electrónico o un radiotelescopio, o cuando la intervención es imposible o bien extremadamente difícil? Se necesitan otras estrategias para validar la observación.² Estas pueden incluir:

1) Comprobaciones experimentales y calibración, en las que el aparato experimental reproduce fenómenos conocidos. Si, por ejemplo, quisiéramos argumentar que el espectro de una sustancia obtenido con un nuevo tipo de espectrómetro es correcto, podríamos comprobar que este nuevo espectrómetro puede reproducir la conocida serie de Balmer para el hidrógeno. Si observamos adecuadamente la serie de Balmer, esto refuerza nuestra creencia de que el espectrómetro funciona correctamente. Ello refuerza también nuestra creencia en los resultados obtenidos con ese espectrómetro. Si la comprobación fracasa, entonces tenemos buenas razones para cuestionar los resultados obtenidos con ese aparato.

2) La reproducción de artificios que de antemano se sabe que están presentes. Un ejemplo de ello viene de experimentos para medir los espectros infrarrojos de moléculas orgánicas (Randall, Fowler *et al.* 1949). No siempre fue posible preparar una muestra pura de tal material. A veces se tenía que colocar la sustancia en una pasta de aceite o en solución. En tales casos, uno espera observar, superpuesto sobre el espectro de la sustancia, el espectro del aceite o el disolvente, que pueden compararse con los espectros conocidos de los mismos. La observación del artificio da confianza en otras mediciones realizadas con el espectrómetro.

3) La eliminación de fuentes plausibles de error y explicaciones alternativas del resultado (la estrategia de Sherlock Holmes).³ Así, cuando los científicos afirmaron haber observado descargas eléctricas en los anillos de Saturno, argumentaron a favor de su resultado mostrando que no podía haber sido causado por defectos en la telemetría, por interacciones con el entorno de Saturno, por relámpagos, ni por polvo. La única explicación que quedaba para el resultado era que se debía a descargas eléctricas en los anillos. No había otra explicación plausible de la observación.

4) Emplear los resultados mismos para argumentar a favor de su validez. Considérese el problema de las observaciones telescópicas que hizo

Galileo de las lunas de Júpiter. Aunque uno bien podría creer que su primitivo telescopio podía haber creado puntos de luz, sería extremadamente implausible que el telescopio los creara de modo que parecieran ser un pequeño sistema planetario con sus eclipses y otros movimientos consistentes. Sería aún más increíble que los puntos creados pudieran satisfacer la Tercera Ley de Kepler ($R^3/T^2 = \text{constante}$). En este caso estamos argumentando que no hay ningún defecto plausible del aparato, o del trasfondo, que pudiera explicar las observaciones.

5) Emplear una teoría de los fenómenos, bien corroborada independientemente, para explicar los resultados. Uno argumenta que es extremadamente improbable que ningún efecto de fondo pueda ajustarse a las predicciones de la teoría.

6) Utilizar un aparato basado en una teoría bien corroborada. En este caso el apoyo con que cuenta la teoría pasa al aparato basado en ella. Este es el caso tanto con el microscopio electrónico como con el radiotelescopio, cuya correcta operación se deriva de una teoría bien contrastada, aunque a menudo también se usan otras estrategias para validar las observaciones.

7) Emplear argumentos estadísticos. Uno puede argumentar que es improbable que el efecto sea debido a una fluctuación estadística.

Estas estrategias, junto con la intervención y la confirmación independiente de Hacking, constituyen una epistemología de la experimentación. Nos suministran buenas razones para creer en los resultados experimentales. Sin embargo, no nos garantizan que los resultados sean correctos. Hay muchos experimentos en los que estas estrategias se han aplicado, pero cuyos resultados se muestra posteriormente que son incorrectos. El experimento es falible.

En *How experiments end* (1987), Peter Galison extendió la discusión del experimento a situaciones más complejas. En sus historias de las mediciones de la razón giromagnética del electrón, del descubrimiento del muón, y del descubrimiento de las corrientes débiles neutras, consideró una serie de experimentos que medían una única cantidad, un conjunto de diferentes experimentos que culminaron en un descubrimiento, y dos experimentos de física de altas energías realizados por grandes grupos de experimentadores con un aparato experimental complejo.

La opinión de Galison es que los experimentos terminan cuando los experimentadores creen tener un resultado que puede soportar un juicio. Un

resultado que, según creo, incluirá y ha incluido la utilización de las estrategias epistemológicas antes discutidas. Galison enfatiza también que, dentro de un gran grupo de experimentadores, distintos miembros del grupo pueden encontrar más convincentes distintos elementos de evidencia. Así, en el experimento Gargamelle sobre corrientes débiles neutras, varios miembros del grupo encontraron especialmente importante la fotografía única del evento de descomposición neutrino-electrón, mientras para otros era decisiva la diferencia en distribución espacial entre los candidatos a corriente neutra observados y el trasfondo de neutrones. Galison atribuye esto, en gran parte, a diferencias entre las tradiciones experimentales en que los científicos desarrollan la habilidad de emplear ciertos tipos de instrumentos o aparatos. Por ejemplo, en la física de partículas existe la tradición de los detectores visuales -como la cámara de niebla o la cámara de burbujas- en contraste con la tradición electrónica -contadores Geiger y de escintilación, cámaras de centelleo-. Los científicos dentro de la tradición visual suelen preferir "eventos dorados" que muestran claramente el fenómeno en cuestión, mientras los pertenecientes a la tradición electrónica suelen encontrar más persuasivos e importantes los argumentos estadísticos que los eventos individuales. (Para mayor discusión de este asunto, véase Galison 1997.)

Galison señala que los grandes cambios en la teoría y en los instrumentos y la práctica experimental no necesariamente ocurren al mismo tiempo. Esta persistencia de los resultados experimentales suministra continuidad a través de los cambios conceptuales. Así, los experimentos sobre la razón giromagnética atraviesan el electromagnetismo clásico, la vieja teoría cuántica de Bohr, y la nueva mecánica cuántica de Heisenberg y Schrödinger. Robert Ackermann ha ofrecido una visión similar en su discusión de los instrumentos científicos:

La ventaja de un instrumento científico es que no puede cambiar de teorías. Los instrumentos incorporan teorías, ciertamente, de otro modo no tendríamos ni idea del significado de su operación (...) Los instrumentos crean una relación invariante entre sus operaciones y el mundo, al menos si abstraemos de la habilidad necesaria para su uso correcto. Cuando nuestras teorías cambian, podemos concebir la significación del instrumento y del mundo con el que está interactuando de manera diferente, y el dato de un instrumento puede cambiar su significado, pero el dato puede sin embargo permanecer idéntico, y habitualmente se esperará que así sea. Un instrumento da una lectura de 2 cuando se expone a un fenómeno. Tras un cambio en la teoría,⁴ continuará mostrando la misma lectura, aún cuando puede ser que ya no consideremos importante esa lectura, o pensemos que nos dice algo distinto de lo que pensábamos originalmente (Ackermann 1985, p. 33).

Galison también discute otros aspectos de la interacción entre experimento y teoría. La teoría puede influir en lo que se considera como un efecto real, que requiere explicación, y lo que se considera trasfondo. En su discusión del descubrimiento del muón, argumenta que los cálculos de Oppenheimer y Carlson, que mostraron que había que esperar lluvias (showers) al pasar electrones a través de la materia, hicieron aparecer como problema las partículas penetrantes, que luego se mostró eran muones. Antes de su trabajo, los físicos pensaban que las partículas en lluvia eran el problema, mientras que se creía entender las partículas penetrantes.

También discute Galison el papel de la teoría como "teoría posibilitadora", aquella que permite el cálculo o la estimación del tamaño del efecto esperado y también del tamaño de los trasfondos esperados. (Véase asimismo Franklin 1995.) Tal teoría puede ayudar a determinar si un experimento es o no realizable. Galison enfatiza también que la eliminación del trasfondo que puede simular o enmascarar un efecto es central en la empresa experimental, y no una actividad periférica. En el caso de los experimentos sobre corrientes débiles neutras, la existencia de las corrientes dependía crucialmente de mostrar que los eventos candidatos no podían deberse todos ellos al trasfondo de neutrones.⁵

También existe el peligro de que el diseño de un experimento pueda impedir la observación de un fenómeno. Galison señala que el diseño original de uno de los experimentos sobre corrientes neutras, que incluía un disparador de muones, no habría permitido observar corrientes neutras. En su forma original el experimento fue diseñado para observar corrientes cargadas, que producían un muón de alta energía. Las corrientes neutras no lo hacen. Así, exigir un disparador de muones hubiera impedido su observación. Sólo después de que se hubiera enfatizado ante los experimentadores la importancia teórica de la búsqueda de corrientes neutras, se cambió el disparador. Por supuesto, el cambio en diseño no garantizaba que se observarían corrientes neutras.

Galison muestra también que las presuposiciones teóricas de los experimentadores pueden entrar en la decisión de terminar un experimento e informar del resultado. Einstein y de Haas finalizaron su búsqueda de errores sistemáticos cuando el valor obtenido para la razón giromagnética del electrón, $g = 1$, concordó con su modelo teórico para electrones orbitales. Este efecto de las presuposiciones teóricas podría causar nuestro escepticismo, tanto ante los resultados experimentales como ante su papel en la evaluación de teorías. La historia de Galison, sin embargo, muestra que en este caso la importancia de la medición llevó a muchas reproducciones de

la misma. Esto condujo a una resultado acordado que no encajaba con las expectativas teóricas. Los científicos no siempre encuentran lo que buscaban.

1.2. *Objeciones*

Collins, Pickering y otros autores han levantado objeciones a la idea de que los resultados experimentales se aceptan sobre la base de argumentos epistemológicos. Señalan que "un crítico lo bastante decidido puede siempre encontrar razones para cuestionar cualquier supuesto 'resultado'" (MacKenzie 1989, p. 412). Harry Collins, por ejemplo, es bien conocido por su escepticismo respecto a los resultados experimentales y la evidencia. Plantea un argumento que llama el "regreso del experimentador" (Collins 1985, cap. 4, pp. 79-111): lo que los científicos consideran como un resultado correcto es aquel que se obtiene con un aparato experimental bueno, esto es, que funciona adecuadamente. Pero un aparato experimental bueno es simplemente aquel que da los resultados correctos. Collins afirma que no hay criterios formales que puedan aplicarse para decidir si un aparato experimental está funcionando adecuadamente o no.

En opinión de Collins, el regreso se rompe eventualmente por negociación dentro de la comunidad científica apropiada, proceso determinado por factores tales como los intereses de carrera, sociales y cognitivos de los científicos, y la utilidad percibida para trabajos futuros, pero que no viene decidido por lo que podríamos llamar criterios epistemológicos o juicios razonados. Así, Collins concluye que su regreso plantea serios interrogantes tanto respecto a la evidencia experimental como a su empleo en la evaluación de hipótesis y teorías científicas. Y por cierto, si no se encuentra ninguna salida del regreso, entonces tiene razón.

El candidato más fuerte que Collins presenta como ejemplo del regreso del experimentador se encuentra en su historia de los intentos iniciales de detectar radiación gravitacional, u ondas de gravedad. (Para una discusión más detallada de este episodio, véase Collins 1985, 1994; Franklin 1994, 1997.) En este caso, la comunidad física se vio forzada a comparar las afirmaciones de Weber, según las cuales había observado ondas de gravedad, con los informes de otros seis experimentos que no las detectaban. Por un lado, Collins arguye que la decisión entre estos resultados experimentales en conflicto no podía tomarse sobre bases epistemológicas o metodológicas: afirma que los seis experimentos negativos no podían ser vistos legítimamente como reproducciones,⁶ y por tanto resultan menos im-

presionantes. Por otro lado, el aparato de Weber no podía ser objeto de técnicas de calibración estándar, precisamente porque los experimentos usaban un nuevo tipo de aparato para intentar detectar un fenómeno hasta entonces nunca visto.⁷

Los resultados presentados por los críticos de Weber no solo eran más numerosos, sino que habían sido cuidadosamente contrastados entre sí. Los grupos habían intercambiado tanto datos como programas de análisis, confirmando sus resultados. Los críticos habían investigado también si su procedimiento de análisis, empleando un algoritmo lineal, podía o no dar cuenta de su incapacidad de observar los resultados de los que daba cuenta Weber. Habían empleado el procedimiento preferido por Weber, un algoritmo no lineal, para analizar sus propios datos, y aún así no encontraron rastro de un efecto. También habían calibrado sus aparatos experimentales insertando pulsos acústicos de energía conocida y encontrando que podían detectar una señal. Por otro lado, ni Weber ni los críticos empleando su procedimiento de análisis podían detectar tales pulsos de calibración.

Existían, además, varias otras dudas serias acerca de los procedimientos de análisis de Weber. Estas incluían un error de programación admitido, que generó coincidencias espurias entre los dos detectores de Weber; posibles sesgos en la selección (de datos) por parte de Weber; su informe de coincidencias entre dos detectores cuando los datos habían sido registrados con cuatro horas de separación; y la cuestión de si el aparato experimental de Weber podía o no producir las estrechas coincidencias que él afirmaba.

Parece claro que los resultados de los críticos eran mucho más creíbles que los de Weber. Habían comprobado sus resultados empleando confirmación independiente, incluyendo el compartir datos y programas de análisis. También habían eliminado una fuente de error plausible, el que los pulsos fueran más largos de lo esperado, analizando sus resultados mediante el empleo de un algoritmo no lineal y buscando explícitamente esos pulsos largos.⁸ Habían calibrado también sus aparatos por inserción de pulsos de energía conocida y observación del resultado.

Al contrario que Collins, creo que la comunidad científica emitió un juicio razonado al rechazar los resultados de Weber y aceptar los de sus críticos. Aunque no se aplicaron reglas formales -tales como: si cometes cuatro errores, y no tres, tus resultados carecen de credibilidad; o: si hay cinco, pero no seis, resultados en conflicto, tu trabajo aún es creíble-, el procedimiento fue razonable.

Pickering argumenta que las razones para aceptar resultados son la utilidad futura de dichos resultados tanto para la práctica teórica como para la experimental, y la concordancia de tales resultados con los compromisos existentes en la comunidad. Discutiendo el descubrimiento de corrientes débiles neutras, Pickering afirma:

Simplemente, los físicos de partículas aceptaron la existencia de corrientes neutras porque podían ver cómo practicar su negocio con más provecho en un mundo en el que la corriente neutra era real (1984b, p. 87).

Las comunidades científicas tienden a rechazar datos que entran en conflicto con los compromisos del grupo y, anversamente (*sic*), a ajustar sus técnicas experimentales para que sintonicen fenómenos consistentes con dichos compromisos (1981, p. 236).

Está claro su énfasis en la utilidad futura y en los compromisos existentes. Estos dos criterios no necesariamente concuerdan. Por ejemplo, hay episodios en la historia de la ciencia en los que ofrece más oportunidades para el trabajo futuro el derrocamiento de una teoría existente. (Véase por ejemplo la historia del derrocamiento de la conservación de la paridad y de la simetría CP discutido más abajo y en Franklin 1986, caps. 1 y 3.)

Pickering ha ofrecido recientemente una visión diferente de los resultados experimentales. En su opinión, tanto el procedimiento material -que incluye el propio aparato experimental y su instalación, la operación con el mismo, y el control de su operación- como el modelo teórico de dicho aparato y el modelo teórico de los fenómenos investigados, son todos ellos recursos plásticos que el investigador lleva a una relación de apoyo mutuo (Pickering 1987; 1989). Su ejemplo es la búsqueda realizada por Morpurgo de quarks libres, o cargas fraccionales de $1/3 e$ o $2/3 e$, donde e es la carga del electrón (véase también Gooding 1992). Morpurgo empleó un aparato moderno de tipo Millikan, e inicialmente encontró una distribución continua de valores de carga. Tras chapucear un tanto con su aparato, Morpurgo encontró que si separaba las placas de (capacitor) obtenía sólo valores enteros de las cargas.

Tras ciertos análisis teóricos, Morpurgo concluyó que ahora su aparato estaba operando adecuadamente, e informó de su fracaso en encontrar evidencia a favor de las cargas fraccionales (Pickering 1987, p. 197).

Pickering ha hecho la importante observación de que los aparatos experimentales raramente funcionan de forma adecuada cuando se operan por

primera vez, y de que se requiere algún ajuste, o chapuceo, antes de que lo hagan. También ha señalado correctamente que la teoría del aparato y la teoría de los fenómenos pueden formar parte, y de hecho lo hacen, del argumento a favor de la validez de un resultado experimental. Según creo, ha puesto demasiado énfasis en la teoría. Era bien sabido desde Millikan que las cargas fraccionales, si es que existen, son muy raras en comparación con las cargas enteras. El fracaso del aparato de Morpurgo en detectar cargas enteras indicaba poderosamente que, pese a su análisis teórico inicial, no era un dispositivo de medición de cargas adecuado. Solo tras algunas chapuzas, cuando el aparato estaba midiendo cargas enteras, superando así una comprobación experimental crucial, se podía legítimamente confiar en sus mediciones de cargas. Aunque el análisis teórico modificado puede haber ayudado a clarificar la situación, lo crucial fue la comprobación experimental. Hay más en un aparato que su análisis teórico.

Ackermann ha ofrecido una modificación de la concepción de Pickering. Sugiere que el aparato experimental es un recurso menos plástico que el modelo teórico del aparato o bien el de los fenómenos.

Por repetirlo, los cambios en A (el aparato) pueden a menudo ser vistos (en tiempo real, sin esperar a la acomodación de B (el modelo del aparato)) como mejoras, mientras que las "mejoras" en B no empiezan a contar a menos que A sea de hecho alterado poniendo en práctica las mejoras conjeturadas. Es concebible que esta pequeña asimetría pueda dar cuenta, finalmente, de las orientaciones a gran escala del progreso científico y de la objetividad y racionalidad de dichas orientaciones (Ackermann 1991, p. 456).

Hacking (1992) ha ofrecido también una versión más compleja de la concepción tardía de Pickering. Sugiere que los resultados de la ciencia de laboratorio madura adquieren estabilidad y son autojustificativos, cuando los elementos de la ciencia de laboratorio son puestos en sintonía y apoyo mutuo. Dichos elementos son: (1) ideas: preguntas, conocimiento de fondo, teoría sistemática, hipótesis tópicas, y modelado del aparato; (2) cosas: blanco, fuente de modificaciones, detectores, herramientas, y generadores de datos; (3) marcas y manipulaciones de marcas: datos, valoración de datos, reducción de datos, análisis de datos, e interpretación. "La ciencia de laboratorio estable surge cuando las teorías y el equipo de laboratorio evolucionan de tal modo que se acoplan unas con otros y resultan mutuamente autojustificativos" (Hacking 1992, p. 56).

Inventamos dispositivos que producen datos y aíslan o crean fenómenos, y una red de teorías a diferentes niveles es verdadera de estos fenómenos. Conversamente, solo

podemos a fin de cuentas contarlos como fenómenos cuando los datos son interpretables por la teoría" (pp. 57-58).

Podemos preguntarnos si semejante ajuste mutuo entre la teoría y los resultados experimentales puede siempre ser alcanzado o no. ¿Qué pasa cuando un resultado experimental es producido por un aparato al que se han aplicado con éxito varias de las estrategias epistemológicas discutidas antes, y el resultado está en desacuerdo con nuestra teoría de los fenómenos? Las teorías aceptadas pueden ser refutadas. Abajo se presentarán varios ejemplos.

Hacking mismo se preocupa por lo que sucede cuando una ciencia de laboratorio que es verdadera de los fenómenos generados en el laboratorio, gracias al ajuste mutuo y la autojustificación, se emplea con éxito al mundo fuera del laboratorio. ¿Habla esto a favor de la verdad de la ciencia? Según Hacking no es así. Si la ciencia de laboratorio llega a producir efectos felices en el "mundo no domesticado, (...) no es la verdad de nada lo que causa o explica los efectos felices" (1992, p. 60).

Así pues, hay un desacuerdo bastante profundo acerca de las razones para aceptar los resultados experimentales. Para algunos, como Galison y yo mismo, se debe a argumentos epistemológicos. Para otros, como Pickering, las razones son de utilidad para la práctica futura y concordancia con los compromisos teóricos aceptados. Aunque la historia de la ciencia muestra que el derrocamiento de una teoría bien aceptada conduce a una cantidad enorme de trabajo teórico y experimental, los proponentes de esta concepción parecen aceptar como algo no problemático que es el acuerdo con la teoría existente lo que siempre tiene una mayor utilidad futura. Hacking y Pickering sugieren también que los resultados experimentales son aceptados sobre la base del ajuste mutuo entre elementos que incluyen la teoría del fenómeno.

Pese a todo, parece haber un acuerdo general en que sobre la base de los resultados experimentales se produce consenso. La pregunta es, ¿cómo son empleados esos resultados?

2. Las funciones del experimento

2.1. Una vida propia

Aunque el experimento toma a menudo su importancia de sus relaciones con la teoría, Hacking señaló que frecuentemente tiene una vida propia, in-

dependiente de la teoría. Menciona las prístinas observaciones del descubrimiento de cometas por Carolyn Herschel, la obra de William Herschel sobre "calor radiante", y la observación de Davy del gas emitido por algas y del refulgir de una cerilla en dicho gas. En ninguno de estos casos tenía el experimentador ninguna teoría del fenómeno bajo investigación.

Al decidir qué investigación experimental llevar a cabo, los científicos pueden muy bien estar influenciados por el equipamiento disponible y por su propia habilidad empleando el equipo (McKinney 1992). Así, cuando el equipo de Mann y O'Neill (Mann-O'Neill collaboration) estaba realizando experimentos de física de altas energías en el Acelerador Princeton-Pennsylvania, a finales de los años 1960, la secuencia de experimentos fue: (1) medición de las ratios de desintegración K^+ , (2) medición de la ratio de ramificación y espectro de desintegración K^+_{e3} , (3) medición de la ratio de ramificación K^+_{e2} , y (4) medición del factor forma en la desintegración K^+_{e3} . Estos experimentos se realizaron básicamente con el mismo aparato experimental, pero con modificaciones relativamente menores en cada experimento particular. Hacia el final de la secuencia, los experimentadores se habían hecho bastante expertos en el uso del aparato y conocedores de los trasfondos y los problemas experimentales. Esto permitió al grupo realizar con éxito los experimentos, técnicamente más difíciles, del final de la secuencia. Podemos llamar a esto "lealtad instrumental" y "reciclado de la experiencia" (ver el ensayo 'Lealtad instrumental y reciclado de la experiencia' en Franklin 1999). Esto se integra a la perfección con la concepción de las tradiciones experimentales de Galison. Los científicos, tanto teóricos como experimentalistas, tienden a centrarse en experimentos y problemas en los que puede emplearse su formación y su experiencia.

Hacking comenta también las "notables observaciones" del espato de Islandia por Bartholin, de la difracción por Hooke y Grimaldi, y de la dispersión de la luz por Newton. "Naturalmente que Bartholin, Grimaldi, Hooke y Newton no eran empiristas necios sin ninguna 'idea' en sus cabezas. Vieron lo que vieron porque eran gente curiosa, inquisitiva, reflexiva. Intentaban elaborar teorías. Pero en todos estos casos está claro que las observaciones precedieron a cualquier formulación de teorías" (Hacking 1983, p. 156). En todos estos casos podemos decir que se trataba de observaciones esperando a una teoría, o quizá incluso pidiéndola. El descubrimiento de cualquier fenómeno inesperado pide una explicación teórica.

2.2. Confirmación y refutación

No obstante, varias de las funciones importantes del experimento involucran su relación con la teoría. El experimento puede confirmar una teoría, refutar una teoría, o dar indicios de la estructura matemática de una teoría.

1. El descubrimiento de la no conservación de la paridad: un experimento crucial

Consideremos primero un episodio en el que la relación entre teoría y experimento fue clara y directa. Se trata de un experimento "crucial", que decidió inequívocamente entre dos teorías en competencia, o dos clases de teoría. El episodio consistió en el descubrimiento de que la paridad, la simetría de reflexión especular o la simetría izquierda-derecha, no se conserva en las interacciones débiles. (Para detalles del episodio, véase Franklin 1986, cap. 1.) Los experimentos mostraron que en la desintegración beta de núcleos orientados, el número de electrones emitidos en la misma dirección que el espín nuclear era diferente del número emitido en la dirección opuesta al espín. Esto constituyó una clara prueba de violación de la paridad en las interacciones débiles. (Ver Figura 1. La imagen especular del experimento difiere del experimento real, probando la no conservación de la paridad.)

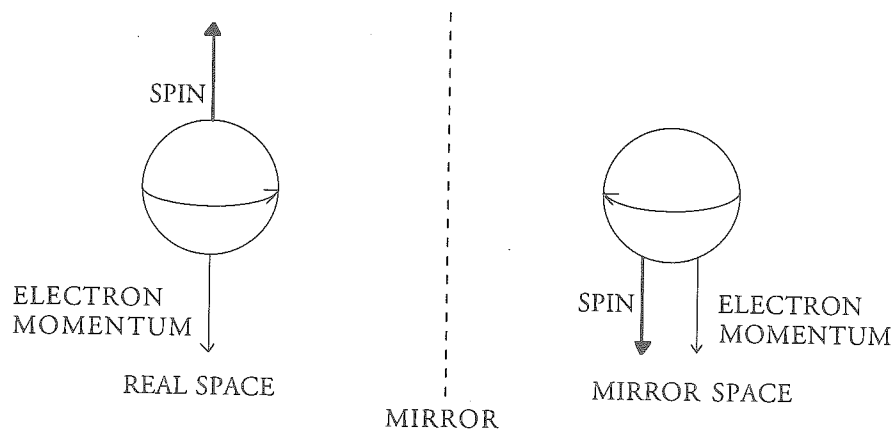


Figura 1. Espín nuclear y momento del electrón de desintegración, tanto en el espacio real como en el espacio imagen. En el espacio real el electrón se emite en la dirección opuesta al espín. En el imagen el electrón se emite en la dirección del espín.

2. El descubrimiento de la violación de la CP: un experimento persuasivo

Tras el descubrimiento de la no conservación de la paridad y de la conjugación de cargas, y siguiendo una sugerencia de Landau, los físicos consideraron como simetría apropiada la CP (paridad combinada o simetría partícula-antipartícula), que todavía se conservaba en los experimentos. Una consecuencia de este esquema, si la CP se conserva, es que el mesón K_1^0 podía desintegrarse en dos piones, mientras que el mesón K_2^0 no podía. Así, la observación de la desintegración de K_2^0 en dos piones indicaría una violación de la CP. La desintegración en dos piones del K_2^0 fue observada por un grupo de la Universidad de Princeton. Aunque se ofrecieron varias explicaciones alternativas, los experimentos fueron eliminando cada una de las alternativas hasta dejar solo la violación de CP como explicación del resultado experimental. (Para más detalles ver Franklin 1986, cap. 3.)

3. El descubrimiento de la condensación de Bose-Einstein: confirmación tras 70 años

En los dos episodios discutidos previamente, la no conservación de la paridad y la violación de la CP, vimos una decisión entre dos clases de teorías en competencia. El episodio del descubrimiento de la condensación de Bose-Einstein (BEC) ilustra la confirmación de una predicción teórica específica 70 años después de que se realizara por primera vez. Bose (1924) y Einstein (1924; 1925) predijeron que un gas de átomos bosónicos sin interacción debe, por debajo de una cierta temperatura, desarrollar repentinamente una población macroscópica en el estado cuántico de más baja energía.⁹ Esto fue observado en 1995 por Cornell, Wieman, y sus colaboradores (Anderson, Ensher *et al.* 1995). Los experimentadores enfriaron una muestra de átomos de ^{87}Rb a temperaturas muy bajas y observaron un repentino incremento en la densidad del gas, evidencia a favor de la BEC.

2.3. Complicaciones

En los tres episodios discutidos en la sección previa, la relación entre experimento y teoría estaba clara. Los experimentos daban resultados inequívocos y no había ambigüedad respecto a lo que la teoría estaba prediciendo. Ninguna de las conclusiones alcanzadas ha sido cuestionada desde entonces. La paridad y la simetría de CP son violadas en las interacciones débi-

les, y la condensación de Bose-Einstein es un fenómeno aceptado. En la práctica de la ciencia las cosas son a menudo más complejas. Los resultados experimentales pueden entrar en conflicto, o pueden incluso ser incorrectos. Los cálculos teóricos pueden también resultar errados, o una teoría correcta puede ser aplicada incorrectamente. Incluso hay casos en los que tanto el experimento como la teoría son erróneos. Como se indicó anteriormente, la ciencia es falible. En esta sección discutiré brevemente varios episodios que ilustran estas complejidades.

1. La caída de la Quinta Fuerza

El episodio de la Quinta Fuerza es un caso de refutación de una hipótesis, pero solo después de haberse resuelto un desacuerdo entre resultados experimentales. Sobre la base de evidencia sugestiva obtenida de mediciones de la gravedad en pozos mineros, de la desintegración del mesón K, y de un nuevo análisis del experimento Eötvös,¹⁰ Fischbach y otros propusieron una "Quinta Fuerza", una modificación de la Ley de Gravitación Universal de Newton (Fischbach, Aronson *et al.* 1986). Los experimentos iniciales dieron resultados en conflicto: uno apoyaba la existencia de la Quinta Fuerza, mientras el otro hablaba en contra de ella. Tras numerosas repeticiones del experimento, la discordancia fue resuelta y se alcanzó un consenso de que la Quinta Fuerza no existía, aun cuando no se había encontrado ningún error en el resultado positivo inicial. Había una enorme preponderancia de evidencia en contra de la existencia de la Quinta Fuerza. (Para más detalles véase Franklin 1993.)

2. Experimento correcto, teoría equivocada: el experimento Stern-Gerlach

El experimento Stern-Gerlach se consideró crucial en los tiempos en que fue realizado, pero, de hecho, no lo era. En opinión de la comunidad de físicos decidía la cuestión entre dos teorías, la mecánica cuántica, que predecía la cuantización espacial, y la mecánica clásica que no lo hacía. El experimento Stern-Gerlach mostraba claramente la cuantización espacial, refutando así la mecánica clásica y dando apoyo a la cuántica. (Véase la Figura 2.) Si la cuantización espacial existe, el rayo se separará en dos partes. Así lo hace. A la luz de trabajos posteriores, sin embargo, la refutación se mantenía pero la confirmación era cuestionable. De hecho, el resultado experimental planteaba problemas para la teoría que aparentemente había confirmado. Se propuso una nueva teoría y, aunque el resultado de Stern-Gerlach inicialmente también planteó problemas para la nueva teoría, tras

una modificación de ésta el resultado la confirmaba. En cierto sentido, fue crucial a pesar de todo; solo que llevó algún tiempo. El experimento Stern-Gerlach suministra evidencia a favor de la existencia del espín del electrón. Estos resultados experimentales se publicaron por vez primera en 1922, aunque la idea de espín electrónico no fue propuesta por Goudsmit y Uhlenbeck hasta 1925 (1925; 1926). Se podría decir que el espín electrónico fue descubierto antes de ser inventado. (Para más detalles de este episodio, ver Weinert 1995.)

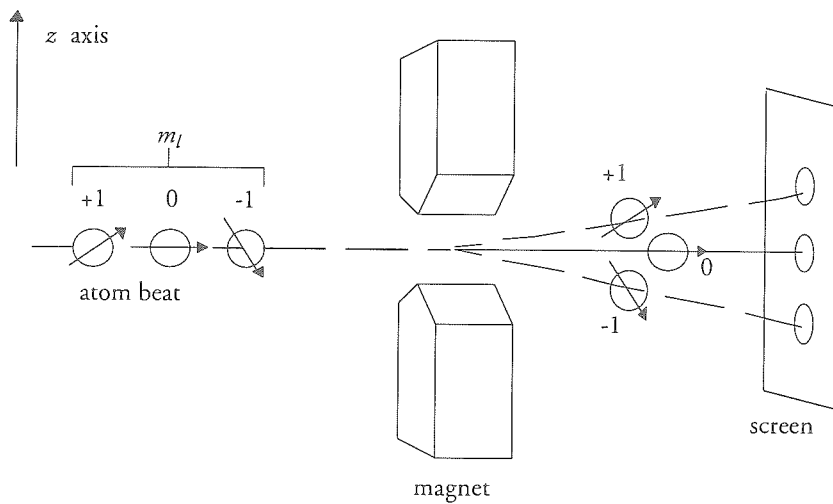


Figura 2. Esquema del aparato experimental de Stern-Gerlach. Un haz de átomos de plata a través de un campo magnético inhomogéneo, y la teoría cuántica predice que el haz se dividirá, mostrando la cuantización espacial. Si los átomos tuvieran un momento angular $L=1$, como Stern y Gerlach creían que era el caso, la teoría cuántica moderna predice que el haz se dividirá en tres (tal como muestra el esquema). El resultado experimental de Stern-Gerlach fue la división del haz en dos; esto se debe a que los átomos estaban en estado $L=0$, y el efecto es causado por el espín de los electrones. En todo caso, el resultado contradecía la predicción de la teoría clásica de Larmor.

3. A veces la refutación no funciona: la doble dispersión de electrones

En la última sección vimos algunas de las dificultades inherentes a la comparación teoría-experimento. A veces uno se enfrenta a la cuestión de si el

aparato experimental satisface las condiciones requeridas por la teoría o, conversamente, si se está comparando con el resultado experimental la teoría adecuada. Un caso al respecto es la historia de los experimentos sobre doble dispersión de electrones por núcleos pesados (dispersión Mott) en los años 1930, y la relación de estos resultados con la teoría del electrón de Dirac, un episodio en el que la cuestión de si el experimento satisfacía o no las condiciones del cálculo teórico era central. Inicialmente, los experimentos no estaban de acuerdo con los cálculos de Mott, arrojando dudas sobre la teoría subyacente de Dirac. Tras más de una década de trabajo, tanto teórico como experimental, se cayó en la cuenta de que había un efecto de trasfondo en los experimentos que enmascaraba el efecto predicho. Cuando se eliminó el trasfondo, hubo acuerdo entre el experimento y la teoría. (Véase Franklin 1986, cap. 3.)

2.4. Otras funciones

1. Evidencia a favor de una nueva entidad: J.J. Thomson y el electrón

La experimentación puede también suministrarnos evidencia a favor de la existencia de las entidades inculcradas en nuestras teorías. Los experimentos de J.J. Thomson sobre rayos catódicos dieron razones en favor de la creencia en la existencia de los electrones. Thomson probó que los rayos catódicos tenían carga negativa y que se comportaban en campos eléctricos y magnéticos exactamente del mismo modo que se comportarían partículas materiales cargadas negativamente. Midió también la razón entre masa y carga de los rayos, encontrando que era mucho más pequeña que ninguna medición anterior. Concluyó que los rayos catódicos eran, de hecho, partículas materiales cargadas negativamente, o en otras palabras, electrones. Esto es un ejemplo del argumento del "pato": si tiene el aspecto de un pato, hace cuá-cuá como un pato, y anadea como un pato, entonces tenemos buenas razones para creer que es un pato.

2. La articulación de la teoría: interacciones débiles

El experimento puede también ayudar a articular una teoría. Los experimentos sobre desintegración beta entre los años 1930 y los 1950 determinaron la forma matemática precisa de la teoría de Fermi de la desintegración beta. (Para detalles de este interesante y complejo episodio, véase Franklin 1990.)

3. Conclusión

En este ensayo se han presentado diversas concepciones de la naturaleza de los resultados experimentales. Algunos argumentan que la aceptación de resultados experimentales está basada en razones epistemológicas, mientras que otros basan la aceptación en la utilidad futura, los intereses sociales, o el acuerdo con los compromisos comunitarios existentes. Todo el mundo está de acuerdo, sin embargo, en que por las razones que sean se llega a alcanzar un consenso respecto a los resultados experimentales. Estos resultados desempeñan entonces muchas funciones importantes en la física, y hemos examinado algunas de estas funciones, aunque ciertamente no todas. Hemos visto al experimento decidir entre dos teorías en competencia, requerir una nueva teoría, confirmar una teoría, refutar una teoría, suministrar evidencia que determina la forma matemática de una teoría, y suministrar evidencia a favor de la existencia de una partícula elemental involucrada en una teoría aceptada. También hemos visto que la experimentación tiene una vida propia, independiente de la teoría. Si, como creo, los procedimientos epistemológicos ofrecen fundamentos (grounds) para una creencia razonable en los resultados experimentales, entonces el experimento puede legítimamente desempeñar las funciones que he discutido y puede suministrar la base del conocimiento científico.

Notas

- 1 Al decir válido, entiendo que se ha argumentado a favor del resultado experimental en formas correctas, empleando estrategias epistemológicas tales como las que se discuten más abajo.
- 2 Véase (Franklin 1986, cap. 6; Franklin 1990, cap. 6) y (Franklin y Howson 1984; 1988) para más detalles sobre estas estrategias, así como una discusión acerca de cómo encajan en una filosofía de la ciencia bayesiana.
- 3 Como le hacía notar Holmes a Watson, "¿Cuántas veces le he dicho que, cuando se ha eliminado lo imposible, lo que resta, *por improbable que resulte*, debe ser la verdad?" (Conan Doyle 1967, p. 638).
- 4 Aquí puede ser útil distinguir entre la teoría del aparato y la teoría del fenómeno. Ackermann está hablando ante todo de la última. Puede que no siempre resulte posible separar esas dos teorías. El análisis de los datos obtenidos de un instrumento puede muy bien involucrar la teoría del fenómeno, pero eso no necesariamente arroja dudas sobre la validez del resultado experimental.
- 5 Otro episodio en el que la eliminación del trasfondo resultó crucial puede verse en la discusión de la medición de la ratio de ramificación (branching ratio) K^*_e2 (Franklin 1990, pp. 115-31).

⁶ Collins ofrece dos argumentos a propósito de la dificultad, si no la imposibilidad virtual, de una reproducción. El primero es filosófico. ¿Qué significa reproducir un experimento? ¿De qué modo es la reproducción similar al experimento original? Una respuesta rápida diría que la reproducción mide la misma cantidad física. Si de hecho lo hace o no, es algo que, según creo, puede ser argumentado sobre bases razonables, como se discutió antes.

El segundo argumento de Collins es pragmático. Se trata del hecho de que en la práctica es a menudo difícil conseguir que un aparato experimental funcione adecuadamente, incluso sabiendo que es similar a otro. Collins ilustra esto con su estudio de los intentos de Harrison de construir dos versiones de un láser TEA (Atmosférico Excitado Transverso) (Collins 1985, pp. 51-78). Pese a que Harrison tenía experiencia previa con dichos láseres, y excelentes contactos con expertos de ese campo, encontró grandes dificultades al construirlos. De ahí la dificultad de una reproducción.

Al fin Harrison encontró errores en su aparato, y una vez que fueron corregidos los láseres operaron adecuadamente. Como admite Collins, "(...) en el caso del láser TEA el círculo fue roto con facilidad. La capacidad del láser de vaporizar cemento, o cualquier cosa, suponía un criterio de calidad experimental universalmente aceptado. Nunca hubo ninguna duda de que el láser debía poder funcionar, y nunca hubo ninguna duda de cuándo estaba operando y cuándo no" (Collins 1985, p. 84).

Aunque Collins parece considerar que los problemas de Harrison con la reproducción arrojan luz sobre el episodio de las ondas de gravedad, apoyan el regreso del experimentador, y arrojan dudas sobre la evidencia experimental en general, realmente no funciona así. Según admite Collins (en la cita del párrafo anterior), la reproducción pudo probarse con claridad. Uno se pregunta qué papel piensa Collins que desempeña este episodio en su argumentación.

⁷ En discusiones más detalladas de este episodio (Franklin 1994; 1997) he argumentado que el experimento de ondas gravitacionales no es en absoluto un caso típico de experimento en física. En la mayoría de los experimentos, como se ilustra en dichos ensayos, la adecuación de la señal vicaria (surrogate signal) empleada en la calibración del aparato experimental es clara y no problemática. En casos en los que resulta cuestionable, se dedica considerable esfuerzo a establecer la adecuación de dicha señal vicaria. Pero aunque Collins ha elegido un ejemplo atípico, creo que las cuestiones que plantea, acerca de la calibración en general y del episodio particular de las ondas de gravedad, deben ser respondidas.

⁸ Weber había sugerido que los verdaderos pulsos de ondas gravitacionales eran más largos de lo esperado, y que el algoritmo de análisis no lineal era más eficiente para la detección de tales pulsos.

⁹ El artículo de Bose fue originalmente rechazado por el *Philosophical Magazine*. Entonces lo envió, en inglés, a Einstein con la petición de que, si Einstein pensaba que el artículo merecía ser publicado, dispusiera su publicación en el *Zeitschrift für Physik*. Einstein en persona tradujo el artículo y lo envió al *Zeitschrift für Physik*, añadiendo una nota del traductor: "En mi opinión, la derivación que da Bose de la fórmula de Planck constituye un avance importante. El método usado aquí suministra también la teoría cuántica de un gas ideal, como discutiré con más detalle en otro lugar" (Pais 1982, p. 423). Esa discusión apareció en artículos del propio Einstein de 1924 y 1925. Para detalles véase (Pais 1982, cap. 3).

- ¹⁰ El experimento Eötvös original fue diseñado para medir la razón de la masa gravitacional a la masa inercial de diferentes sustancias. Eötvös encontró que estas dos masas eran iguales hasta aproximadamente una parte en un millón. Fischbach *et al.* reanalizaron los datos de Eötvös y encontraron un efecto dependiente de la composición, que interpretaron como evidencia a favor de la Quinta Fuerza.

BIBLIOGRAFIA

- Ackermann, R.: 1985, *Data, Instruments and Theory*, Princeton University Press.
- Ackermann, R.: 1991, 'Allan Franklin, Right or Wrong', in A. Fine, M. Forbes, L. Wessels (eds.): *PSA 1990, Volume 2*, Philosophy of Science Association, pp. 451-457.
- Anderson, M.H., Ensher, J.R., Matthews, M.R. et al.: 1995, 'Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor,' *Science* 269, 198-201.
- Bose, S.: 1924, 'Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese', *Zeitschrift fur Physik* 26, 178-181.
- Collins, H.: 1985, *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*, London, Sage Publications.
- Collins, H.: 1994, 'A Strong Confirmation of the Experimenters' Regress', *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 25(3), 493-503.
- Conan Doyle, A.: 1967, 'The Sign of Four', *The Annotated Sherlock Holmes*, ed. W.S. Barrington-Gould, New York, Calrkson N. Potter.
- Einstein, A.: 1924, 'Quantentheorie des einatomigen idealen Gases', *Sitzungsberichte der Preussische Akademie der Wissenschaften Berlin*, 261-267.
- Einstein, A.: 1925, 'Quantentheorie des einatomigen idealen Gases', *Sitzungsberichte der Preussische Akademie der Wissenschaften Berlin*, 3-14.
- Fischbach, E., Aronson, S., Talmadge, C. et al.: 1986, 'Reanalysis of the Eötvös Experiment', *Physical Review Letters* 56, 3-6.
- Franklin, A.: 1986, *The Neglect of Experiment*, Cambridge University Press.
- Franklin, A.: 1990, *Experiment, Right or Wrong*, Cambridge University Press.
- Franklin, A.: 1993, *The Rise and Fall of the Fifth Force: Discovery, Pursuit, and Justification in Modern Physics*, New York, American Institute of Physics.
- Franklin, A.: 1994, 'How to Avoid the Experimenters' Regress', *Studies in the History and Philosophy of Science* 25, 97-121.
- Franklin, A.: 1995, 'Laws and Experiment', in F. Weinert (ed.): *Laws of Nature*, Berlin, De Gruyter, pp. 191-207.
- Franklin, A.: 1997, 'Calibration', *Perspectives on Science* 5, 31-80.
- Franklin, A.: 1999, *Can That Be Right? Essays on Experiment, Evidence, and Science*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Franklin, A., Howson, C.: 1984, 'Why Do Scientists Prefer to Vary Their Experiments?', *Studies in History and Philosophy of Science* 15, 51-62.
- Franklin, A., Howson, C.: 1988, 'It Probably is a Valid Experimental Result: A Bayesian Approach to the Epistemology of Experiment', *Studies in the History and Philosophy of Science* 19, 419-427.
- Galison, P.: 1987, *How Experiments End*, University of Chicago Press.
- Galison, P.: 1997, *Image and Logic*, University of Chicago Press.
- Gooding, D.: 1992, 'Putting Agency Back Into Experiment', in A. Pickering (ed.): *Science as Practice and Culture*, University of Chicago Press, pp. 65-112.

- Hacking, I.: 1981, 'Do We See Through a Microscope?', *Pacific Philosophical Quarterly* 63, 305-322.
- Hacking, I.: 1983, *Representing and Intervening*, Cambridge University Press.
- Hacking, I.: 1992, 'The Self-Vindication of the Laboratory Sciences', in A. Pickering (ed.): *Science as Practice and Culture*, University of Chicago Press, pp. 29-64.
- MacKenzie, D.: 1989, 'From Kwajelein to Armageddon? Testing and the Social Construction of Missile Accuracy', in D. Gooding, T. Pinch, S. Shaffer (ed.): *The Uses of Experiment*, Cambridge University Press, pp. 409-435.
- Pais, A.: 1982, *Subtle is the Lord...*, Oxford University Press.
- Pickering, A.: 1981, 'The Hunting of the Quark', *Isis* 72, 216-236.
- Pickering, A.: 1984a, *Constructing Quarks*, University of Chicago Press.
- Pickering, A.: 1984b, 'Against Putting the Phenomena First: The Discovery of the Weak Neutral Current', *Studies in the History and Philosophy of Science* 15, 85-117.
- Pickering, A.: 1987, 'Against Correspondence: A Constructivist View of Experiment and the Real', in A. Fine, P. Machamer (ed.): *PSA 1986*, Pittsburgh, Philosophy of Science Association, vol. 2, pp. 196-206.
- Pickering, A.: 1989, 'Living in the Material World: On Realism and Experimental Practice', in D. Gooding, T. Pinch, S. Shaffer (ed.): *The Uses of Experiment*, Cambridge University Press, pp. 275-297.
- Randall, H.M., Fowler, R.G., Fuson, N. et al.: 1949, *Infrared Determination of Organic Structures*, New York, Van Nostrand.
- Uhlenbeck, G.E., Goudsmit, S.: 1925, 'Ersetzung der Hypothese von unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons', *Naturwissenschaften* 13, 953-954.
- Uhlenbeck, G.E., Goudsmit, S.: 1926, 'Spinning Electrons and the Structure of Spectra', *Nature* 117, 264-265.
- Weinert, F.: 1995, 'Wrong Theory-Right Experiment: The Significance of the Stern-Gerlach Experiments', *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 26B(1), 75-86.

Allan Franklin es Profesor de Física en la Universidad de Colorado (EE.UU.). Trabaja sobre historia y filosofía de la ciencia, con especial énfasis sobre la experimentación en física. Es autor de *The Neglect of Experiment* (1986); *Experiment, Right or Wrong* (1990); *Can That Be Right? Essays on Experiment, Evidence and Science* (1999); y el reciente *Are There Really Neutrinos? An Evidential History*.